

University of Groningen

Geluid en trillingen tengevolge van het heien van prefabpalen voor de spoortunnel bij Zevenaar.

van den Berg, G.P.

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2001

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

van den Berg, G. P. (2001). *Geluid en trillingen tengevolge van het heien van prefabpalen voor de spoortunnel bij Zevenaar*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

RUG

Ψ \vec{E} t' \mathfrak{E} N_2

$\$$ \textcircled{C} \mathcal{H} \triangle $\%$ Σ

ω \perp \aleph $[k]$ \ddot{e} \angle \S

Geluid en trillingen

tengevolge van het heien

van prefabpalen voor de

spoortunnel te Zevenaar



Geluid en trillingen tengevolge van het heien van prefab palen voor de spoortunnel te Zevenaar

G.P. van den Berg

Datum: juli 2001

Uitgavenummer: NWU-105

Aantal blz: 30

Natuurkundewinkel

Rijksuniversiteit Groningen

Nijenborgh 4

9747 AG Groningen

tel: 050 - 3634867

NAWI@PHYS.RUG.NL

*De Natuurkundewinkel stelt
natuurkundige kennis en vaardigheid
beschikbaar aan niet-commerciële
instanties, groepen en overheden,
door het verlenen van advies en het
uitvoeren van onderzoek*

blz. 2

INHOUD

	blz.
1 INLEIDING	3
2 GEMETEN GROOTHEDEN EN GRENSWAARDEN	
2.1 Gemeten grootheden	4
2.1 Grenswaarden	5
3 MEETLOCATIES, APPARATUUR	
3.1 Meetlocaties	6
3.2 Meetmethode en apparatuur	7
4 MEETRESULTATEN	8
4.1 Resultaten: achtergrond	10
4.2 Resultaten: trillingen	10
4.3 Resultaten: geluid buitenshuis	13
4.4 Resultaten: geluid binnenshuis	13
4.5 Resultaten: laagfrequent geluid binnenshuis	14
5 CONCLUSIES	17
BIJLAGEN	19
A Tijdsverloop van geluids- en trillingsniveaus	20
B Geluids- en trillingsspectra	23
C Artikel "Hoorbaar infrageluid door heien in zand"	26

1 INLEIDING

Na een heiverbod zijn op 22 februari 2001 de heiwerkzaamheden aan de spoortunnel aan de oostzijde van Zevenaar hervat. Daarbij werd, net als in december 2000, weer met prefabpalen geheid. Op grond van klachten die omwonenden in december 2000 uitten zijn in januari 2001 metingen verricht naar het geluid in en bij woningen en naar de trillingen in en van woningen tengevolge van het heien. In die tijd (januari) werden echter vibrocompalen geheid waarvan de overlast, volgens omwonenden, veel minder was dan van de eerder toegepaste prefabpalen.

Na het hervatten van het heien van prefabpalen zijn opnieuw metingen verricht om na te gaan of de effecten daarvan meetbaar verschillen van die van de vibrocompalen.

Van een aantal metingen in januari is in een eerdere notitie een analyse gegeven ("Heien van de spoortunnel Zevenaar: de herkomst van het laagfrequent geluid", Groningen, 14 februari 2001). Daarin werd geconcludeerd dat de door het heien opgewekte bodemtrillingen een huis in trilling brengen waarop de in trilling gebrachte constructie laagfrequent geluid afstraalt met een zo hoog niveau dat het in huis waarneembaar kan zijn. Op grond van berekeningen zou een trillingsnelheid van 0,1 mm/s een geluidsniveau van 71 dB veroorzaken.

De opzet van het hier gerapporteerde onderzoek was het geluidsniveau buitenshuis ook na het heien en na alle bouwwerkzaamheden ('achtergrond') te bepalen, alsmede -vooral- de hoeveelheid laagfrequent geluid in de woningen. Trillingsmetingen binnenshuis zouden worden 'meegenomen' omdat deze belangrijk werden geacht als verklaring voor de hoeveelheid laagfrequent geluid.

Het is, zie genoemde notitie, volkomen duidelijk dat er een samenhang is tussen de door het heien opgewekte bodemtrillingen enerzijds en de in omliggende woningen voorkomende trillingen en laagfrequent geluid anderzijds. Een analyse van het verband valt echter buiten het bestek van dit onderzoek. Ten behoeve van een artikel voor het vaktijdschrift Land+Water is echter toch enig onderzoek daarnaar gedaan; in bijlage C is de ingediende tekst daarvoor opgenomen. Gemiddeld blijkt daaruit dat een trillingssnelheid van 0,1 mm/s inderdaad een laagfrequent of infra-geluidsniveau van 70 dB veroorzaakt. Bij de dominante trillingsfrequentie ligt dat niveau echter tot ruim 10 dB lager, bij een andere (vermoedelijk resonantie-) frequentie echter ca. 10 dB hoger.

2 GEMETEN GROOTHEDEN EN GRENSWAARDEN

2.1 Gemeten grootheden

Aan de hand van metingen moet de hoeveelheid geluid binnen en buiten een aantal woningen worden bepaald, alsmede het aandeel van het laagfrequent geluid daarin. Tenslotte moet ook de trillingssterkte in de woningen worden bepaald.

De *totale hoeveelheid geluid* binnen- en buitenshuis wordt gemeten overeenkomstig de gevoeligheid van het menselijk gehoor (dat bij verschillende frequenties niet even gevoelig is); de zogeheten A-weging simuleert die gevoeligheid. De totale hoeveelheid 'gewoon' geluid wordt daarom uitgedrukt in A-gewogen deciBels (dB(A)).

Binnenshuis bestaat het geluid hier echter voor een belangrijk deel uit laagtonig oftewel *laagfrequent geluid*. In de praktijk is, in de meeste gevallen waar van lawaai sprake is, dit laagfrequente aandeel van ondergeschikt belang omdat het verwaarloosbaar is in vergelijking met de hoeveelheid gewoon geluid. Hier is dat binnenshuis echter niet het geval: het laagfrequente aandeel van het bouwlawaai bepaalt voor een belangrijk deel de hoeveelheid geluid binnenshuis. Er is geen algemeen aanvaarde manier om de hoeveelheid laagfrequent geluid in JIn getal uit te drukken. De hoeveelheid laagfrequent geluid zal hier worden gegeven als de hoeveelheid fysisch aanwezig geluid, uitgedrukt in decibel (dB). Omdat het hoorbare aandeel van dit geluid sterk afhankelijk is van de frequentie, wordt de hoeveelheid laagfrequent geluid bij verschillende frequenties (namelijk per tertsband) bepaald.

De *trillingssterkte* tenslotte wordt bepaald uit de gemiddelde snelheid waarmee de vloer trilt. Omdat mensen niet voor alle trillingen even gevoelig zijn, wordt er op de gemeten trillingssnelheid een frequentie-afhankelijke correctie toegepast als het gaat om trillingen die hinder kunnen veroorzaken. De trillingssterkte wordt daarna uitgedrukt als een bepaalde getalswaarde, zonder eenheid.

Als trillingen schade zouden kunnen veroorzaken, wordt niet de gemiddelde, maar de maximale trillingssnelheid bepaald, en wordt er geen frequentie-afhankelijke correctie toegepast.

De hoeveelheid geluid buitenshuis (het geluidsniveau op de gevel) wordt gemeten volgens en getoetst aan de Circulaire Bouwlawaai. Omdat de Circulaire weinig specifiek is over de meetwijze, is hiervoor zoveel mogelijk aangesloten bij de gebruikelijke meetmethoden (zie Handreiking Meten en Rekenen Industrielawaai).

De hoeveelheid laagfrequent geluid wordt gemeten volgens de NSG Richtlijn Laagfrequent Geluid. Omdat het heien gedurende de dagperiode plaats vindt (de Richtlijn gaat uit van nachtelijke overlast en daarom ook nachtelijke metingen) is niet in een slaapkamer gemeten, maar in ruimten waar de bewoners overdag verblijven (m.n. de woonkamer). De totale hoeveelheid geluid binnenshuis is op dezelfde plaats bepaald.

De trillingssterkte die van belang is voor eventuele hinder wordt bepaald volgens de SBR Richtlijn "Hinder voor personen in gebouwen" (SBR2). Er is hier niet specifiek gemeten aan de voor schade relevante trillingssterkte, welke volgens de SBR Richtlijn "Schade aan gebouwen" had moeten worden gemeten.

2.1 Grenswaarden

In de projectovereenkomst afgesloten tussen NS Railinfrabeheer en gemeente is vastgelegd dat de hoeveelheid geluid bij omwonenden getoetst moet worden aan de Circulaire Bouwlawaaai, de trillingssterkte aan de richtlijnen SBR1 en SBR2. In een bespreking in het gemeentehuis van Zevenaar op 5 februari 2001 is dit nader gepreciseerd, aangezien voor relatief kortdurende perioden (minder dan drie maanden) de aanbevolen grenswaarden in de Circulaire en SBR Richtlijnen niet eenduidig zijn gegeven.

De hoeveelheid *geluid buitenshuis*, het geluid op de gevel, tengevolge van de bouwwerkzaamheden mag volgens de Circulaire Bouwlawaaai niet hoger zijn dan 60 dB(A). Overeenkomstig het verslag van de bespreking van 5-2-2001 moet, een geluidsbelasting tot 65 dB(A) zoveel mogelijk worden gereduceerd. Bij een geluidsbelasting boven 65 dB(A) moeten aanvullende c.q. andere maatregelen worden genomen om ernstige overlast voor de omgeving te voorkomen. De Circulaire spreekt van "de geluidsbelasting op de gevels van woningen", zodat aangenomen mag worden dat hier is bedoeld het invallende geluid (de geluidsimmissie) zonder het door de gevel gereflecteerde geluid. Op geluid gemeten v\er een gevel moet dus nog een gevelcorrectie (= aftrek) van 3 dB worden toegepast. Als de geluidsbelasting zich gedurende een deel van de dagperiode (7:00 - 19:00 uur) voordoet, dan wordt op de geluidsbelasting een bedrijfsduurcorrectie toegepast. Deze is gelijk aan $10\log(\text{bedrijfstijd}/\text{dagperiode})$, dus bij bouwwerkzaamheden van 7:00 tot 16:00 uur: $10\log(9/12) = -1,2$ dB.

Overigens beveelt de Circulaire voor het heien ook aan een eis te stellen aan de maximum geluidsemissie van 87 dB(A) op 15 meter afstand. Aan deze eis wordt bij het heien onder water voldaan.¹

Voor de totale hoeveelheid 'gewoon' *geluid binnenshuis* tengevolge van de bouwwerkzaamheden is geen aparte grenswaarde voorzien.

Voor het *laagfrequent geluid in de woning* wordt, volgens het verslag van 5-2-2001, voorlopig een 'hindercurve' gehanteerd die bij frequenties tot en met 31,5 Hz (tertsband) overeenkomt met de referentie-curve van de NSG (zie tabel 1). Bij frequenties daarboven (tot 100 Hz) ligt deze hindercurve steeds verder boven de NSG-curve en sluit in feite aan bij een niveau dat overeenkomt met ongeveer 20 dB(A).

**Tabel 1: gehanteerde beoordelingscriteria voor laagfrequent geluid
(ongewogen geluidsniveaus per tertsband)**

frequentie tertsband (Hz)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
NSG-curve	92	88	84	74	64	55	46	39	33	27	22	18	14	10
'hindercurve'				74	64	55	50	47	44	42	38			

¹ bij het heien van de vibrocompalen werd door mij op 16 januari 2001 op ca. 50 meter afstand een geluidsniveau van 86 dB(A) (LAeq tijdens heien) gemeten

blz. 6

Mogelijk *hinderlijke trillingen* van vloeren mogen de streefwaarden volgens SBR2 niet overschrijden, waarbij echter, vanwege de beperkte duur van de trillingen, een ophoogfactor van 2 wordt toegepast. Dat betekent de volgende grenswaarden:

- een trillingssterkte tot 0,2 is toelaatbaar (grenswaarde A1)
- een trillingssterkte boven 0,6 is niet toelaatbaar (grenswaarde A2)
- indien grenswaarde A1 wordt overschreden, is dat toelaatbaar als de gemiddelde trillingssterkte niet meer is dan 0,1 (grenswaarde A3)

De tijdens het heien gemeten trillingssterkte dient te worden gemiddeld over de gehele dagperiode. Daarbij wordt de tijdens de duur van het heien gemeten (gemiddelde) trillingssterkte vermenigvuldigd met een factor wortel(duur heien/dagperiode), dus bijvoorbeeld bij heien gedurende 6 uur op een dag: $\sqrt{6/12} = 0,7$.

Om *schadelijke trillingen* te voorkomen moet de maximale trillingssnelheid, gemeten op de woningconstructie, niet meer zijn dan 2 mm/s.

3 MEETLOCATIES, APPARATUUR

3.1 Meetlocaties

Op 28 februari en 1 maart 2001 zijn metingen verricht van het geluid en de trillingen tengevolge van het heien van prefabpalen. Het geluid is gemeten in en nabij de woningen. De trillingen zijn gemeten op de vloer van de kamer waar mensen overdag enige of langere tijd verblijven. In de meeste gevallen was dat de woonkamer, in JJn geval is ook op de overloop gemeten, en in JJn geval in een slaapkamer waar overdag een kind zou slapen (dat echter vanwege de heiwerkzaamheden uithuizig was).

Ook is op twee locaties de trillingssterkte in huis gemeten van of vlak bij de buitengevel (op de vensterbank) of van de vloer bij een binnenmuur en op een van deze locaties is ook de trillingssterkte van de bodem buiten gemeten.

Er is gemeten in een zestal woningen overeenkomstig een lijst samengesteld door mw. Koenen van de gemeente Zevenaar. Deze woningen lagen meest nabij de heistelling, namelijk aan de Oud Zevenaarseweg (OZw). Ook is gemeten in wat verder weg liggende woningen aan de Panovenweg (Pw) en de Kerkstraat (Ks). In tabel 2 (blz. 9) is een overzicht gegeven van de precieze locaties waar in deze woningen het geluid en de trillingen zijn gemeten, het type vloer (opgave bewoner) en de door middel van een plattegrond bepaalde afstanden tot de (geschatte) plaats van de heistelling.

Op de eerste dag (28 februari) is in en bij vier woningen gemeten: OZw 11 en 19, Pw 15 en Ks 32. Op de tweede dag (1 maart) is in twee woningen gemeten: OZw 34 en 20. Ook is op de tweede dag gemeten op de overloop van woning Ks 32.

De metingen zijn uitgevoerd door drs H.J. Kaper (alleen eerste dag) en ir G.P. van den Berg.

3.2 Meetmethode en apparatuur

Het geluidsniveau buiten is meestal (nl. op de eerste dag van meten) gemeten met een Brüel & KjFr Investigator voorzien van een B&K 4189 ½"-microfoon. Het geluidsniveau binnen (en op de tweede dag buiten) is gemeten met een Larson Davis 2800 Geluidsmeter/Spectrumanalyzer met een LD 2541 ½"-microfoon. Het geluid binnen is ook op DAT-tape opgenomen (Tascam DA-P1 DAT-recorder) met een Sennheiser MKH 20 P48 1"-microfoon. De geluidsmeters zijn voor en na meting op elke locatie geijkt met een ijkbron B&K 4230.

De trillingen zijn gemeten met een B&K 4370V versnellingsopnemer en een signaalconditionering (filters en integrator) overeenkomstig SBR2. Ook deze zijn opgenomen op DAT-tape, maar de resultaten van de tape blijken door een stoorsignaal niet direct bruikbaar meer. De hieronder gebruikte trillingssnelheden zijn waarden die ter plekke direct (na de signaalconditionering volgens SBR2) zijn geregistreerd met de Larson Davis 2800.

De ijking vond plaats voor en na de metingen op elke locatie met een trillingstafel met een uitwijking (top-top) van 1,56 mm en een frequentie van 12,5 Hz; de ijknelheid is daardoor 43,3 mm/s (rms of effectieve waarde). Achteraf bleek deze ijking verkeerd te zijn door een onregelmatige loop van de trillingstafel. De daardoor momentaan optredende hoge waarden van de trillingsversnelling veroorzaakten oversturing van de signaalversterker. In feite werd daardoor op een effectief verlaagde signaalwaarde geijkt. Uit een reconstructie van de instellingen achteraf bleek dat de aanvankelijke meetwaarden met een factor 32 zijn overschat (dat dit niet al meteen in de conceptrapportage is rechtgezet werd weer veroorzaakt door een direct op de metingen volgende afwezigheid i.v.m. vakantie).

Oversturing van de signaalversterker trad overigens tijdens de metingen zelf niet op. Nadat achteraf de juiste ijkwaarde is bepaald, zijn de hierna gepresenteerde resultaten correct.

De trillingssnelheden worden in het vervolg ook wel als niveau gepresenteerd ten opzichte van 0,03 mm/s (0 dB is dan een trillingssnelheid van 0,03 mm/s, 10 dB is 0,1 mm/s, 20 dB is 0,3 mm/s, 30 dB is 1,0 mm/s).²

Voor de trillingssterkten (frequentiegewogen trillingssnelheden) geldt hetzelfde ten opzichte van 0,03 (0 dB is een trillingssterkte van 0,03, 10 dB is 0,1, 20 dB is 0,3, 30 dB is 1,0). Trillingssterkten beneden 0,1 kunnen in het algemeen niet worden waargenomen.

² Aanvankelijk was gekozen voor trillingsniveaus re 1 mm/s. Na constatering van de ijkfout is er voor gekozen de gemeten niveaus ongewijzigd te laten, en de referentiewaarde (= ijkwaarde) aan te passen.

4 MEETRESULTATEN

De meeste metingen vonden plaats tijdens het heien. Het heien duurde per paal meestal 30 B40 minuten, waarvan de eerste minuten luider waren (vermoedelijk de fase waarin het heiblok nog boven water is). Ongeveer elke seconde was er een slag. Er werden op de dagen van meting resp. 8 en 10 palen per dag geheid; de tijd dat er geheid wordt is daardoor groter dan de eerder aangenomen 3 uur (6 maal een half uur) per dag. De bedrijfsduurcorrectie zal derhalve kleiner zijn. Hoeveel dat is hangt af van de aangenomen tijd per dag dat er geheid dan wel gewerkt wordt. Voor de geluidsbelasting op de gevel zal deze correctie bij de prefabpalen overigens van weinig invloed zijn omdat het geluidsniveau voor een belangrijk deel door het overige bouwlawaai wordt veroorzaakt.

Voor de over de dagperiode gemiddelde waarden van de trillingssterkte zal de correctie bij 6 uur heien (zoals op 28 februari en 1 maart 2001) leiden tot een vermindering met een factor 0,7 ($= \sqrt[3]{6/12}$) van de tijdens het heien gemiddelde trillingssterkte. Bij het heien gedurende 3 uur zou de vermindering ten opzichte van de trillingssterkte tijdens heien een factor 0,5 ($= \sqrt[3]{3/12}$) bedragen.

Tijdens het heien kan men in een nabije woning het volgende waarnemen. Het heigeluid zelf is, zeker nadat de eerste fase van het heien (boven water) voorbij is, niet of nauwelijks waarneembaar. Bij elke slag trilt het huis en hoort men het huis als het ware ‘zuchten’: het huis beweegt en maakt geluid op een manier die lastig te beschrijven is, onder andere omdat het een uiterst ongebruikelijke ervaring is. In het onderstaande worden hiervoor dan ook objectieve meetwaarden gegeven. Bij elke slag of ‘zucht’ trillen ook dingen mee (deuren, kasten, servies) of kraakt een constructiedeel zoals een kozijn.

Buitenshuis is het heigeluid na de eerste fase niet meer waarneembaar. Wel kan men de bodemtrillingen voelen. Wel hoort men de heimachine zelf meer en minder geluid maken in het tempo van het heien.

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de resultaten. In bijlage A is het verloop in de tijd gegeven van een aantal meetwaarden. Zoveel mogelijk is gegeven:

buitenshuis: het verloop per minuut van

- 1) het equivalente geluidsniveau $L_{Aeq,buiten}$

binnenshuis: het verloop per halve minuut van

- 2) het maximum geluidsniveau L_{Amax} ,
- 3) het equivalente geluidsniveau L_{Aeq}
- 4) het minimum geluidsniveau L_{Amin}

Dit zijn alle A-gewogen geluidsniveaus.

Ook is op een aantal tijdstippen het maximum snelheidsniveau $L_{v,max}$ (re 0,03) gegeven. Meestal is dat op een relevante plaats op de vloer, soms ook op de constructie (muur, vensterbank) of buiten. De meeste metingen zijn verricht tijdens het heien. Elke grafiek van het tijdsverloop in de bijlage begint bij het begintijdstip zoals gegeven rechtsonder bij de grafiek.

Verder zijn in de bijlage tertsbandspectra gegeven van het equivalente geluidsniveau per 30 seconden, en van de maximale trillingssterkte, eveneens per 30 seconden.

4.1 Resultaten: achtergrond

Een aantal metingen vond plaats na het heien om het ‘achtergrondniveau’³ buiten te bepalen, dat wil zeggen het geluidsniveau zonder de invloed van het heien, maar wel met het overige bouwlawaai. Bij de trillingen en het laagfrequente geluid met frequenties tot en met 40 Hz (tertsband) is de ‘achtergrondwaarde’ zo laag dat deze, ten opzichte van de waarde bij heien, verwaarloosbaar is. De meetwaarden tijdens het heien worden daar dus ook geheel door het heien bepaald. Dit laagfrequente geluid in de woningen wordt geproduceerd door de door het heien veroorzaakte trillingen van de bodem en van de woning.

Het algehele ‘gewone’ geluidsniveau (breedbandig A-gewogen equivalent geluidsniveau) in de woningen werd door het heien maar beperkt beïnvloed: de verhoging door het heien bedroeg maximaal ca. 5 dB(A). Vooral in de eerste fase van het heien, als het geluid van de heislagen nog hoorbaar is, wordt het geluidsniveau in en buiten de woningen verhoogd door het heien. Na deze eerste fase, als het slaan onder water plaats vindt, heeft het heigeluid zelf relatief weinig invloed op het ‘gewone’ (A-gewogen) geluidsniveau in en buiten de woningen.

De overige geluiden van de bouwwerkzaamheden (d.w.z. alle ‘niet-hei’-geluiden) zijn echter niet verwaarloosbaar. Bij de woning OZw 20 bedraagt het geluidsniveau op de gevel tijdens de werkzaamheden 63 dB(A), na afloop van de werkzaamheden is dat (iets verderop direct naast OZw 14 in het vlak van de gevel) 52 dB(A). Dat laatste geluid is het omgevingsgeluid zonder bouwlawaai. Opvallend is dan (na afloop van de werkzaamheden) echter nog een aggregaat dat vlakbij het heiplatform staat en een lage toon produceert. Deze blijkt, gemeten direct naast OZw 14, een frequentie van 50 Hz (grondtoon) te hebben met een niveau dat afhankelijk blijkt van tijd en/of plaats van 67 tot 79 dB (= 37 tot 49 dB(A)). Op enkele meters van het aggregaat (in het akoestische nabijheidsveld) is het niveau niet duidelijk hoger (67 dB).

4.2 Resultaten: trillingen

De trillingssterkte (frequentiegewogen trillingssnelheid volgens SBR2) is op elke locatie gemeten op een aantal tijdstippen tijdens het heien en (soms) ook na het heien. Tijdens het heien nam de trillingssterkte in meerdere of mindere mate toe (zie in de bijlage het verloop in de tijd bij OZw 11, 19 en Pw 15).

De gemiddelde trillingssterkte tijdens het heien is het hoogst in de slaapkamer op de eerste verdieping van de op ca. 80 meter van de heistelling gelegen woning OZw 11: 0,89. De tegelijkertijd door Fugro gemeten waarde op de benedenverdieping van deze woning (vloer eetkamer) bedroeg 0,68.⁴

³ uitgedrukt als een LAeq, dus geen referentieniveau LA95

⁴ Fugro: “Conceptresultaten beoordeling automatische meting Oude Zevenaarseweg 11”, 14-3-2001. De door Fugro bepaalde dominante frequentie beneden was lager dan op de bovenverdieping (14 tegen ca. 30 Hz), hetgeen in elk geval ten dele een lagere waarde beneden zou kunnen verklaren (bij constante *uitwijking* is de trillingssnelheid evenredig met de frequentie)

In andere nabije woningen (OZw 20, OZw 34, Pw 15) bedraagt de gemiddelde trillingssterkte tijdens het heien 0,24 tot 0,38. In een vierde nabije woning (OZw 19) werd een relatief lage waarde van 0,12 gevonden.

Een relatief hoge waarde werd ook nog op ruim 300 m afstand gevonden: op de eerste houten verdiepingvloer van Ks 32 kwam een waarde voor van 0,39 terwijl op de stenen begane grond vloer de waarde 0,04 bedroeg. De bewoner van Ks32 had in een binnenwand op de eerste verdieping schade geconstateerd; de meting vond plaats op de vloer direct naast die binnenwand. Deze meting vond derhalve niet in eerste instantie plaats vanwege daar optredende trilling*hinder*.

De meetwaarden zijn samengevat in tabel 4.

In woning OZw 19 werd een, gezien de afstand, relatief lage waarde gevonden. Mogelijk wordt deze lage waarde veroorzaakt door de aanpandige buurwoning en andere gebouwen die tussen OZw 19 en de heistelling stonden; deze kunnen OZw 19 enigszins hebben afgeschermd voor de bodemgolven of de bodemgolven hebben verzwakt.

De trillingssterkte in Pw 15 is in de eerste fase van het heien relatief hoog (tot 1,7). De oorzaak daarvan is onduidelijk, maar mogelijk is dit niet het gevolg van het heien. Deze eerste waarden zijn daarom bij de beoordeling van de trillingssterkte in Pw 15 weggelaten.

Beoordeling op hinder

De gemeten trillingssterkten zijn in tabel 4 samengevat. De vanuit het oogpunt van hinder toelaatbare waarde voor kortdurende trillingen (grenswaarde A1 = 0,2) wordt in de meeste onderzochte woningen overschreden. De maximaal toelaatbare trillingssterkte (grenswaarde A2 = 0,6) wordt alleen in OZw 11 overschreden. De gemiddeld toelaatbare waarde (grenswaarde A3 = 0,1) wordt in de meeste woningen overschreden. De over de dagperiode gemiddelde waarde is berekend door de tijdens het heien gevonden trillingssterkte te vermenigvuldigen met de waarde 0,7 (overeenkomend met 6 uur heien per dag).

Tabel 4: gemeten trillingssterkten en grenswaarden volgens SBR2

woning	ruimte in huis	hoogst gemeten trillingssterkte	overschrijding grenswaarde		gemiddelde trillingssterkte		overschrijding grenswaarde
			A1 (0,2)	A2 (0,6)	tijdens heien	overdag	A3 (0,1)
OZw 20	woonk/keuken	0,56	ja	nee	0,38	0,26	ja
OZw 11	slaapkamer	0,96	ja	ja	0,89	0,62	ja
OZw 34	woonkamer	0,43	ja	nee	0,31	0,22	ja
OZw 19	woonkamer	0,14	nee	nee	0,12	0,08	nee
Pw 15	woonkamer	0,45	ja	nee	0,24	0,17	ja
Ks 32	woonkamer	0,05	nee	nee	0,04	0,03	nee
Ks 32	overloop	0,47	ja	nee	0,39	0,27	ja

Beoordeling op schade

De metingen kunnen alleen indicatief worden gebruikt voor een beoordeling op schade volgens SBR1. De volgens SBR1 te bepalen trillingssnelheid wijkt namelijk op enkele punten af van de bepaling volgens SBR2:

blz. 12

- a) de frequentieweging die volgens SBR2 is toegepast zorgt voor een onderschatting van de werkelijk optredende trillingssnelheid bij (vooral) frequenties beneden ca. 10 Hz. In de meeste gevallen werden echter vooral hogere trillingsfrequenties gevonden, zodat deze frequentieweging (hier) verwaarloosbaar is.
- b) Volgens SBR1 moet de momentane trillingssnelheid worden gemeten, niet de effectieve waarde volgens SBR2. De maximale momentane waarde van een harmonisch signaal is een factor 1,4 (= $\sqrt{2}$) hoger dan de maximale effectieve (rms) waarde. De hier gegeven hoogst gemeten trillingssterkten moeten derhalve tenminste met 40% worden verhoogd.
- c) Bij SBR1 moeten in eerste instantie trillingssnelheden op de draagconstructie van de woning worden gemeten, eventueel ook op het midden van overspanningen (vloeren). Volgens SBR2 moet op de meest hinderlijk trillende plaats op de vloer worden gemeten. Bij deze metingen is in de woningen OZw 20 en OZw 34 echter ook gemeten op de vensterbank (draagconstructie) en in de woning Ks 32 op het midden van de verdiepingsvloer. Op de vensterbank van zowel OZw 20 als OZw 34 werd een waarde van 0,3 mm/s overschreden; de maximale momentane waarde is dus zeker groter dan 0,4 mm/s. Voor de meest veraf gelegen woning Ks 32 werd, ongeveer midden op de eerste verdieping, een trillingssterkte van 0,47 (momentaan: tenminste 0,66 mm/s) gevonden; op de begane grond was dat aanmerkelijk minder.

In de projectovereenkomst voor de spoortunnel is vastgelegd dat de maximaal toelaatbare trillingssterkte gemeten conform SBR1 gelijk is aan 2 mm/s. Op basis van de hier gemeten trillingsterkten lijkt deze waarde in geen van de onderzochte woningen overschreden te worden.

Overigens hebben de bewoners van OZw 20 en van Ks 32 scheuren laten zien die volgens hen door het heien zijn ontstaan. Het is, gezien de grenswaarden volgens SBR1, onwaarschijnlijk dat dit uitsluitend door de trillingen met de hierboven gegeven sterkten wordt veroorzaakt.

Buiten

Bij woning OZw 20 zijn op de plaats direct achter het huis trillingsmetingen gedaan van de (van stoeptegels voorziene) bodem. Deze bewoog in verticale richting, waarin ook de overige metingen zijn gedaan, met gemiddeld 0,38 mm/s (rms waarde). Een vergelijkbare waarde werd binnenshuis gevonden. De trillingsopnemer is hier ook op twee posities verticaal tegen het huis geplaatst, zodat trillingen in horizontale richtingen kon worden gemeten. In horizontale richting, wijzend naar de heistelling, was de trillingssnelheid hoger (0,5 mm/s) dan in verticale richting, in horizontale richting dwars daarop zwakker (0,25 mm/s). Het huis beweegt dus niet alleen op en neer, maar ook heen en weer, het meest, lijkt het, 'voor en achterover deinend' op de bodemgolven vanaf de heistelling. Op de verdieping zal mogelijk een sterkere horizontale trilling van het huis optreden; daarvan zijn (hier) echter geen metingen gedaan.

Overigens zijn deze metingen buiten uitsluitend uitgevoerd om de verticale beweging van de bodem en de horizontale bewegingen van het huis te kennen, niet om deze aan enige grenswaarde te toetsen.

4.3 Resultaten: geluid buitenshuis

Het geluidsniveau nabij of op de gevels van de nabije (t.o.v. heistelling) woningen OZw 11, 19 en 20 bedraagt 62 B 64 dB(A) (zie tabel 5). Dit wordt zeker niet alleen door het heien zelf bepaald, maar vooral door het overige bouwlawaai. De geluidsbelasting over de gehele dagperiode zal 1,2 dB lager zijn, uitgaande van een bedrijfsduur van 9 uur (7:00 – 16:00 uur).

Het geluidsniveau bij Pw 15 is gemeten voor de achtergevel, dus is inclusief het door deze gevel gereflecteerd geluid. Het geluidsniveau bij OZw 19 is gemeten voor de schuur achter de woning en bevat de reflectie van de schuur. De overige metingen zijn vrij van nabije reflecties.

Het geluidsniveau buitenshuis bij Ks 32 wordt vooral bepaald door nabij wegverkeer en mensen en veel minder door de bouwwerkzaamheden.

Het LAeq over de dagperiode en met aftrek van een eventuele gevelcorrectie van 3 dB is in tabel 5 gegeven op basis van de gemeten waarden en werktijden op 28 februari en 1 maart 2001. Daaruit blijkt dat de richtwaarde van 60 dB(A) bij de meest nabije woningen wordt overschreden met 2 dB.

Tabel 5: geluidsniveaus op en in de woningen

woning	LAeq op/nabij gevel tijdens heien	LAeq, immissie over dagperiode	overschrijding		ruimte in huis	LAeq in huis tijdens heien
	dB(A)	dB(A)	60 dB(A)	65 dB(A)		dB(A)
OZw 20	63,3	62	ja	nee	woonk/keuken	45
OZw 11	63,5	62	ja	nee	slaapkamer	43
OZw 34	niet gemeten		--	--	woonkamer	42
OZw 19	62,1	57	nee	nee	woonkamer	37
Pw 15	52,0	48	nee	nee	woonkamer	35
Ks 32	51,1	51	nee	nee	woonkamer	36
OZw 14	na afloop bouwwerkzaamheden: 52,4	"achtergrond": 52				

Na afloop van de bouwwerkzaamheden is het geluidsniveau aanmerkelijk lager: op (naast) de gevel van OZw 14 werd een equivalent geluidsniveau van 52 dB(A) gemeten.

Op 1 maart werd geconstateerd dat ook na afloop van de werkzaamheden een aggregaat (volgens een omwonende voor de waterpomp) direct bij de heistelling actief bleef. Dit aggregaat veroorzaakt tonaal geluid van 50 Hz (daarnaast zijn ook boventonen herkenbaar). Een tonale component van 50 Hz is ook in de spectra binnenshuis -vooral als niet geheid wordt- goed herkenbaar, zelfs in de verder afliggende woningen (zie figuren in bijlage).

4.4 Resultaten: geluid binnenshuis

Het geluidsniveau binnenshuis wordt door de bouwwerkzaamheden op drie manieren beïnvloed:

- 1) het heilawaai kan direct de woning indringen;
- 2) de heislagen veroorzaken trillingen van de bodem en van de woning die daardoor zelf geluid uitzenden;
- 3) het geluid van de overige bouwwerkzaamheden kan direct de woning indringen.

Het eerstgenoemde geluid kan, afhankelijk van de fase van het heien (heiblok boven/onder water) en van de afstand, voor een verhoging van enkele dB(A) zorgen; zie bijv. het tijdsverloop (in bijlage A) van het LAeq bij OZw 11 en OZw 19.

De tweede bijdrage is laagfrequent geluid (zie hieronder) alsmede geluid van rinkelend servies, klapperende deuren etc. Dit geluid verhoogt het totale A-gewogen niveau met maximaal enkele dB.

De derde bijdrage is niet onbelangrijk. Men kan uit tabel 5 opmaken dat het LAeq in woningen dichtbij de bouwplaats hoger is dan op grotere afstanden (in Ks 32, aan de rand van het stadscentrum met relatief veel verkeer, is het geluidsniveau binnen relatief hoog vanwege het nabije verkeer). Ook is het 'achtergrondgeluid' in de omgeving van de bouwplaats, na afloop van de dagelijkse bouwwerkzaamheden, duidelijk lager dan tijdens de werkzaamheden (zie tabel 5). Er is echter geen geluidsniveau gemeten in de woningen na afloop van de bouwwerkzaamheden.

De totale hoeveelheid (A-gewogen) geluid in de woningen tijdens het heien bedraagt 35 B 45 dB(A) (zie tabel 5). Het verschil tussen het geluidsniveau buitens- en binnenshuis bedraagt 15 tot 25 dB(A), hetgeen overeen komt met waarden die men voor de geveldemping verwacht.

4.5 Resultaten: laagfrequent geluid binnenshuis

In de woningen wordt, door de trillingen veroorzaakt door het heien, laagfrequent geluid uitgestraald door vloeren en wanden. Ook de in trilling gebrachte bodem buiten straalt laagfrequent geluid uit. Tenslotte veroorzaken ook de overige bouwwerkzaamheden niet onbelangrijke hoeveelheden laagfrequent geluid.

In tabel 6 zijn de gemeten equivalente geluidsniveaus gegeven ten opzichte van de referentie-curve volgens NSG, dus als overschrijding of onderschrijding (negatieve waarde) van de NSG-curve. De NSG-curve is de gehoordrempel van relatief goedhorende mensen van 50 - 60 jaar.

Overschrijding van de NSG-curve is dus een maat voor de *hoorbaarheid* van het geluid tussen (hier) 10 en 100 Hz. De overschrijding is ook gegeven voor de buiten gemeten niveaus, hoewel de beoordeling van het laagfrequent geluid niet op het geluid buiten betrekking heeft. Overschrijding geeft ook dan echter aan of het laagfrequente geluid hoorbaar kan worden geacht. Tevens is in tabel 6 gegeven of de tijdens de bespreking op 5-2-2001 gepresenteerde 'hindercurve' is overschreden.

De maximale geluidsniveaus liggen, gemiddeld per tertsband (10 - 40 Hz) en over alle locaties, 6 dB hoger dan de equivalente waarden. Het verschil tussen het maximum en equivalente geluidsniveau per tertsband is minimaal 2 dB en maximaal 16 dB.

**Tabel 6: equivalent niveaus per tertsband in laagfrequent gebied
ten opzichte van NSG-curve**

	frequentie tertsband (Hz)		10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	16 - 40
	niveau NSG-curve (dB)		92	88	84	74	64	55	46	39	33	27	22	
woning			overschrijding NSG-curve (positieve waarden)											
OZw 11	slaapkamer	niet heien	-40	-37	-33	-19	-14	-12	-9	12	15	20	26	niet
OZw 11	slaapkamer	heien	-39	-24	-9	2	2	6	6	15	19	26	32	10
OZw 19	woonkamer	niet heien	-45	-52	-42	-29	-32	-16	0	15	4	7	15	0
OZw 19	woonkamer	heien	-33	-28	-23	-3	-3	8	20	19	10	16	19	20
OZw 20	wk/lkeuken	heien	-12	-10	-7	5	8	16	21	26	28	31	33	22
OZw 34	woonkamer	niet heien	-25	-23	-22	-16	-16	-2	11	30	28	30	32	11
OZw 34	woonkamer	heien	-16	-11	-6	2	-1	21	29	32	29	29	29	29
Pw 15	woonkamer	niet heien	-44	-34	-37	-27	-18	-9	3	10	12	14	15	3
Pw 15	woonkamer	heien	-37	-29	-14	-8	1	2	14	16	12	18	19	14
Ks 32	woonkamer	niet heien	-49	-38	-41	-26	-16	-3	2	9	10	9	8	2
Ks 32	woonkamer	heien	-41	-25	-30	-14	1	9	11	12	14	9	9	13
OZw11	buiten	begin heien	-21	-18	-15	-13	0	12	21	36	33	35	53	12
OZw11	buiten	heien later	-20	-10	-10	-6	0	14	16	32	40	31	39	14
OZw 11	buiten	niet heien	-33	-27	-23	-12	-6	9	18	23	27	33	37	9
OZw19	buiten	begin heien	-27	-21	-21	-10	-7	10	19	29	30	32	43	10
OZw19	buiten	heien later	-25	-17	-16	-7	-5	10	17	27	33	30	34	10
Pw 15	buiten	heien later	-22	-18	-13	-7	4	11	6	15	27	24	26	12
Pw 15	buiten	niet heien	-34	-29	-26	-17	-6	7	16	17	17	20	24	7
Ks 32	buiten	heien later	-35	-31	-24	-14	-6	3	13	14	17	20	24	3

(witte vakken: geen overschrijding NSG-curve; lichtgrijze vakken: overschrijding NSG-curve; donkergrijze vakken: overschrijding 'hindercurve')

Bij frequenties tot en met 40 Hz is er een duidelijk verschil tussen de geluidsniveaus binnenshuis die zijn gemeten tijdens en na het heien; boven 40 Hz is dat verschil gering of afwezig. Kennelijk veroorzaakt het heien zelf dus laagfrequent geluid bij frequenties tot en met 40 Hz. Door de overige bouwwerkzaamheden wordt laagfrequent geluid bij hogere frequenties (50 Hz en hoger) veroorzaakt.

Binnenshuis treden overschrijdingen van de NSG-curve op bij alle frequenties boven 40 Hz, zowel tijdens het heien als zonder dat er geheid wordt. Zonder heien is dit (mede) vanwege het overige lawaai van de bouwwerkzaamheden. Opvallend is dat de 50 Hz tertsband op alle locaties, zowel tijdens als na het heien, voor duidelijk verhoogde niveaus zorgt in de woningen. Zoals eerder genoemd, werd door een aggregaat bij de heistelling een geluid van 50 Hz uitgestraald.

Bij frequenties vanaf 50 Hz is het geluidsniveau buitenshuis groter dan in de woningen, hetgeen men normaliter zou verwachten bij een bron buitenshuis. Bij lagere frequenties treden binnenshuis soms hogere niveaus op, in overeenstemming met een bron binnenshuis.⁵ In tabel 7 is, van de woningen waarvan deze gegevens gemeten waren, het verschil tussen de geluidsniveaus binnen- en buitenshuis gegeven voor die frequenties

⁵ als het om een tonaal geluid zou gaan zou ook een geringe geveldeemping met resonantie in de woning een hoger geluidsniveau binnenshuis kunnen verklaren

blz. 16

waarbij het geluidsniveau binnenshuis boven de NSG-curve lag. Daaruit blijkt dat het geluid binnenshuis bij de frequenties beneden 50 Hz soms wel binnenshuis lijkt te ontstaan (binnen luider dan buiten), maar soms ook niet (buiten luider dan binnen).

Tabel 7: verschil in geluidsniveaus buiten - binnen tijdens heien

frequentie (Hz)	20	25	31,5	40	50	63	80	100
woning								
OZw11	-8	-2	8	10	17	21	5	7
OZw19	-4	-2	2	-3	8	23	14	15
Pw 15	2	3	10	-8	-1	15	6	7
Ks 32	0	-7	-5	2	2	3	10	14

(grijze vakken: niveau binnen hoger dan buiten)

Beoordeling laagfrequent geluid

Laagfrequent geluid met niveaus zoals hier gemeten zal voor vele mensen waarneembaar zijn. Infrageluid (geluid met frequenties beneden en tot ca. 30 Hz) wordt in nagenoeg alle voorgestelde criteria voor laagfrequent geluid hinderlijk geacht zodra het kan worden waargenomen: er zijn verschillende beoordelingscriteria voorgesteld die alle de gehoordrempel als uitgangspunt hebben. Al deze criteria worden overschreden.

Bij deze lage frequenties wordt een geluid als luider ervaren dan een 'gewoon' geluid van dezelfde sterkte boven de gehoordrempel (referentiefrequentie: 1000 Hz). Een verhoging (vanaf de gehoordrempel) van 20 dB bij 20 Hz komt voor het 'gemiddelde gehoor' overeen met een verhoging van 45 dB bij 1000 Hz.

Bij frequenties van 20 tot 40 Hz liggen de door het heien verhoogde geluidsniveaus boven de NSG-curve. In dit frequentiegebied ligt het totale equivalente geluidsniveau tijdens het heien tot 29 dB boven de NSG-curve (hierbij zijn de bijdragen van de tertsbandniveaus boven de NSG-curve gesommeerd). De belangrijkste bijdrage daarin levert het geluid in de tertsband van 40 Hz, daarna die van 31,5 Hz. Het totale equivalente geluidsniveau ligt in dit frequentiegebied tijdens het heien tot 25 dB boven de 'hindercurve' (som bijdragen tertsbandniveaus boven 'hindercurve').

5 CONCLUSIES

Het heien van de prefabpalen veroorzaakt bodemtrillingen die zich (deels) als golven langs het bodemoppervlak voortplanten. Net als bij watergolven is dit een voortgaande, rollende beweging waarbij de bodem zowel horizontaal (op en neer) als horizontaal (heen en weer) beweegt. Een woning volgt deze beweging van de bodem, waarbij vloeren en muren bij voorkeur trillen in hun eigen- of resonantiefrequenties. Bij deze trillingen wordt door zowel de bodem (buitenshuis) als door de constructie (binnenshuis) laagfrequent geluid van dezelfde frequentie als de trillingen uitgezonden.

De trillingssnelheden van de bodem liggen dicht bij deze resonantiefrequenties, hetgeen de relatief sterke ‘reactie’ van de woningen bepaalt.

De *maximale trillingssterkte* ligt in de meeste woningen beneden de vanuit het oogpunt van *hinder* door de gemeente Zevenaar vastgestelde hoogst toelaatbare maximale trillingssterkte van 0,6. In de (kinder)slaapkamer van de woning OZw 11 wordt deze waarde echter overschreden (0,96), op de begane grond van OZw 20 benaderd (0,56).

De over de dagperiode *gemiddelde trillingssterkte* van de begane grond vloer bedraagt in de meest nabije woning (OZw 20, 75 meter) 0,26, in de meest afgelegen (Ks 32, ca. 300 m) 0,03. Op de eerste verdieping is de gemiddelde trillingssterkte in de woning OZw 11 (80 m) 0,62, in de meest afgelegen (Ks 32, 300 m) 0,27.

In vier woningen (OZw 11, 20, 34 en Pw 15) overschrijdt de over de dagperiode gemiddelde trillingssterkte de door de gemeente vastgestelde hoogst toelaatbare waarde van 0,1. In een vijfde woning (Ks 32), waar zich een overschrijding voordoet op de eerste verdieping, lijkt de klacht minder op hinder dan op schade te zijn gericht.

De trillingssnelheid die bepalend is voor de beoordeling van *schadelijke trillingen* is niet direct gemeten. Enkele meetwaarden zijn wel indicatief daarvoor, namelijk waar gemeten is op een vensterbank (draagconstructie) of op het midden van een overspanning. De daaruit afgeleide trillingssnelheden overschrijden nergens de voor deze spoortunnel overeengekomen grenswaarde van 2 mm/s. Het is onwaarschijnlijk dat uitsluitend de geconstateerde trillingen schade veroorzaken aan woningen. Tenminste twee bewoners (OZw 20 en Ks 32) stellen nochtans dat het heien schade veroorzaakt in hun woning.

De trillingen veroorzaken een relatief hoog niveau van *laagfrequent geluid* in de woningen. De sterkte daarvan wordt waarschijnlijk bepaald door de trillingssterkte van de bodem en van vloeren en wanden. Het laagfrequent geluid is (hier) voor de menselijke waarneming moeilijk te scheiden van de trillingen. In feite wordt men blootgesteld aan een uiterst ongebruikelijke combinatie van trillingen en geluid, welke sensatie moeilijk te beschrijven is.

Het heien zelf veroorzaakt in elke woning een toename van het geluid bij frequenties tot en met 40 Hz. Bij hogere frequenties (vanaf 50 Hz) is het laagfrequente geluid in de woning (deels) afkomstig van de overige bouwwerkzaamheden. Met name een tonaal geluid (vermoedelijk van een aggregaat) is duidelijk aanwijsbaar in het geluid binnenshuis.

blz. 18

Criteria voor laagfrequent geluid zijn bij zeer lage frequenties (infrageluid, frequenties t/m 31,5 Hz) gebaseerd op de gehoordrempel: het kunnen waarnemen van infrageluid wordt al mogelijk hinderlijk geacht. De NSG-curve, gebaseerd op de gehoordrempel van ouderen, is van deze criteria het minst strenge criterium voor infrageluid. De gemeten equivalente infrageluidsniveaus (som overschrijdingen tertsbanden t/m 31,5 dB) overstijgen de NSG-curve, en tevens de 'hindercurve', met waarden tot 21 dB. Het geluidsniveau tengevolge van het heien zelf (frequenties tot 40 Hz) overschrijdt de NSG-curve met waarden tot 29 dB, de 'hindercurve' met waarden tot 25 dB.

Voor de maximale geluidsniveaus is de overschrijding gemiddeld ca. 6 dB groter.

Het (daggemiddelde) equivalente geluidsniveau op de gevel bedraagt voor de meest nabije woningen tussen de 60 en 65 dB(A). Dit niveau wordt niet alleen door het heien, maar vooral bepaald door de overige bouwwerkzaamheden. Na afloop van alle werkzaamheden, als alleen nog een aggregaat hoorbaar is, bedraagt het geluidsniveau op een nabije woning (OZw 14) 52 dB(A).

In tabel 8 is een overzicht opgenomen van alle geconstateerde overschrijdingen van de bij de bouw van de tunnel voorgestelde grenswaarden.

Voor wat betreft het geluid buitenshuis beperkt de overschrijding zich tot woningen binnen 100 meter van de heistelling. Overschrijding van de grenswaarden voor hinderlijke trillingen doen zich voor tot in woningen op 150 meter afstand, maar niet in JJn dichterbij gelegen woning (OZw 19, 125 meter). Ook doet een overschrijding zich voor in een woning op 300 meter afstand, waar klachten echter eerder de schade leken te betreffen.

Overschrijdingen van de voorgestelde grenswaarden voor laagfrequent geluid doen zich in alle woningen voor.

Tabel 8: overzicht overschrijdingen voorgestelde grenswaarden

	hinder trillingen			geluid buiten		laagfrequent geluid binnen (10 – 40 Hz)	
	A1 (0,2)	A2 (0,6)	A3 (0,1)	60 dB(A)	65 dB(A)	NSG-curve	'hindercurve'
woning							
OZw 20	ja	nee	ja	ja	nee	ja	ja
OZw 11	ja	ja	ja	ja	nee	ja	ja
OZw 34	ja	nee	ja	- -	- -	ja	ja
OZw 19	nee	nee	nee	nee	nee	ja	ja
Pw 15	ja	nee	ja	nee	nee	ja	ja
Ks 32	nee	nee	nee	nee	nee	ja	ja
Ks 32	ja	nee	ja	nee	nee	- -	- -

(- -: niet gemeten)

BIJLAGEN

BIJLAGE A

Per meetlocatie is gegeven:

- het verloop met de tijd per minuut van het equivalente A-gewogen geluidsniveau
 - per minuut op de gevel $L_{Aeq,buiten}$
- het verloop met de tijd per halve minuut binnenshuis van het A-gewogen
 - maximum geluidsniveau L_{Amax}
 - equivalente geluidsniveau L_{Aeq}
 - minimum geluidsniveau L_{Amin}
- op een aantal tijdstippen
 - het maximum snelheidsniveau $L_{v,max}$ (re 0,3 mm/s)

(elke grafiek begint bij het begintijdstip zoals gegeven rechtsonder bij de grafiek)

BIJLAGE B

Per meetlocatie zijn gegeven een aantal tertsbandspectra tijdens en zonder heien van

- het equivalente geluidsniveau binnenshuis per 30 seconden
- de maximale trillingssterkte per 30 seconden

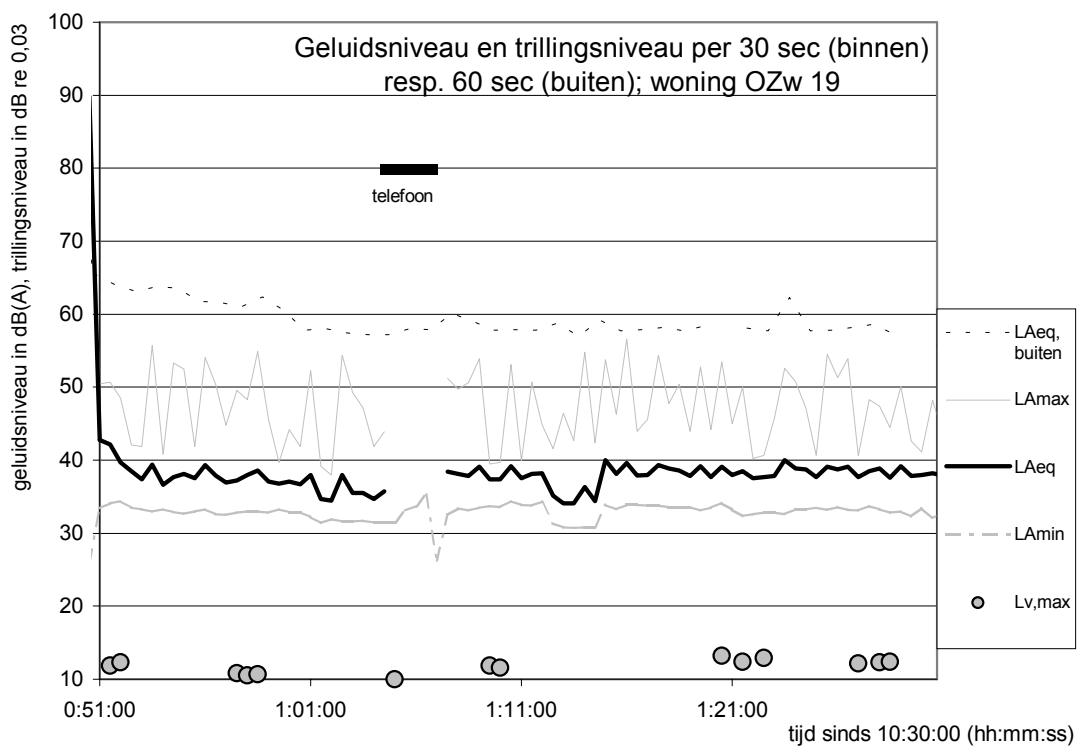
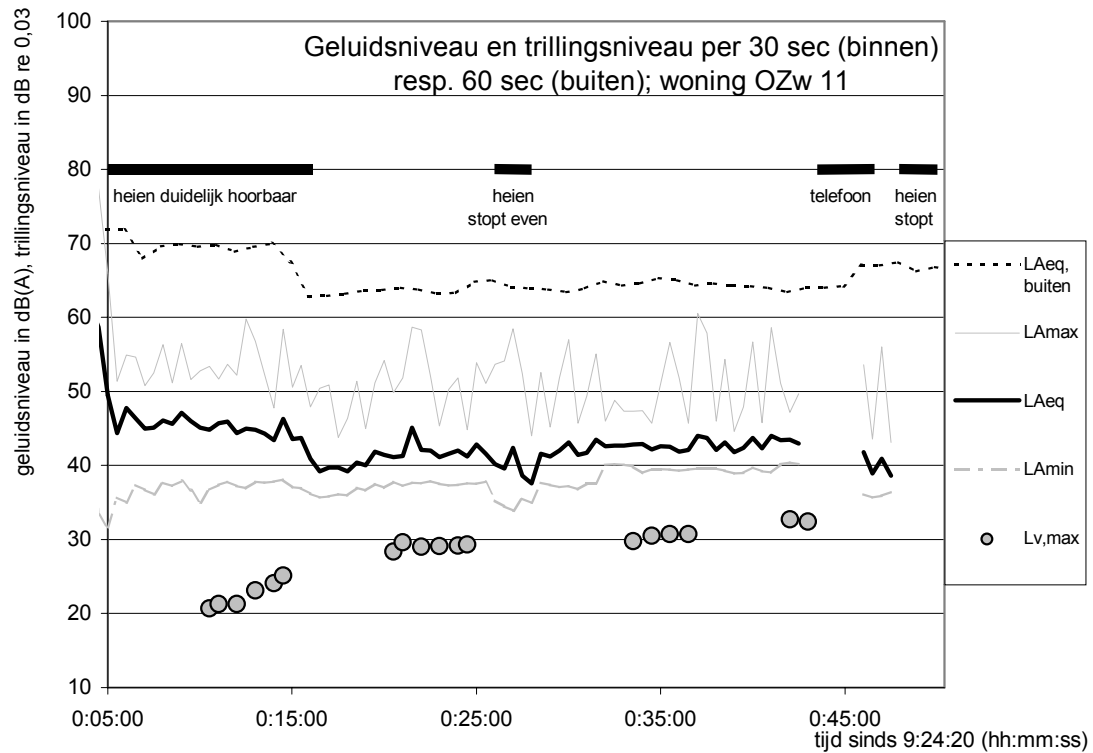
Bij KS 32 werd het geluidsniveau buiten beïnvloed door verkeer en kinderen.

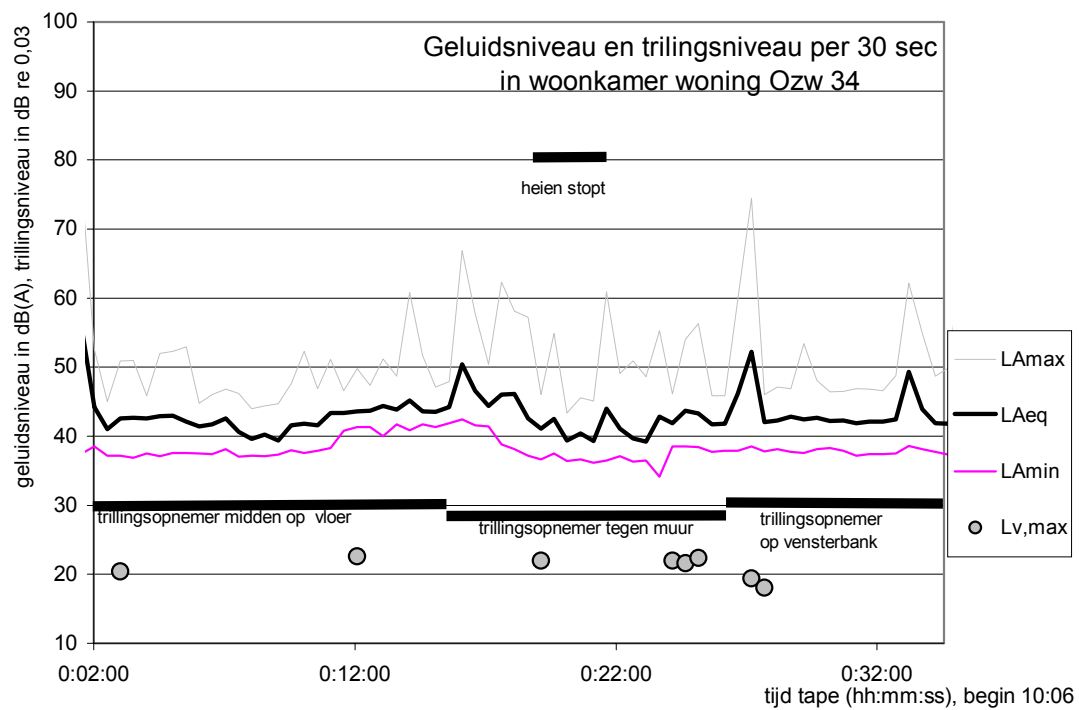
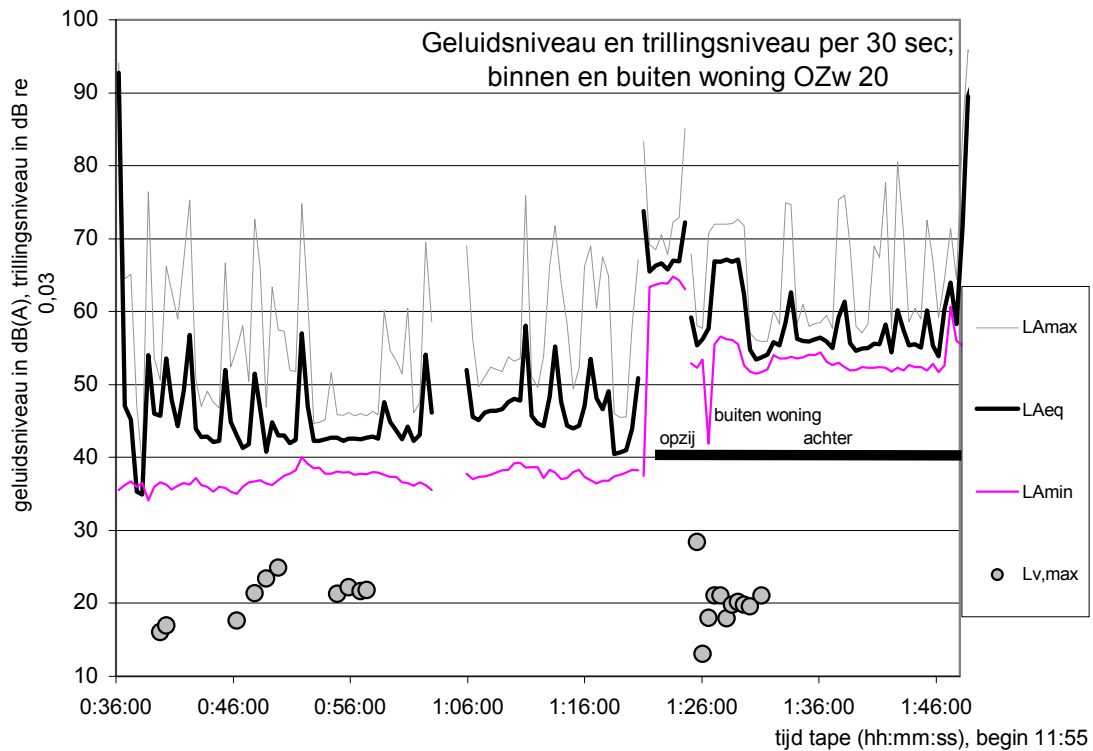
In de woningen OZw 20 en OZw 34 werd het geluidsniveau binnenshuis beïnvloed door de aanwezigheid van mensen die niet altijd stil waren.

BIJLAGE C

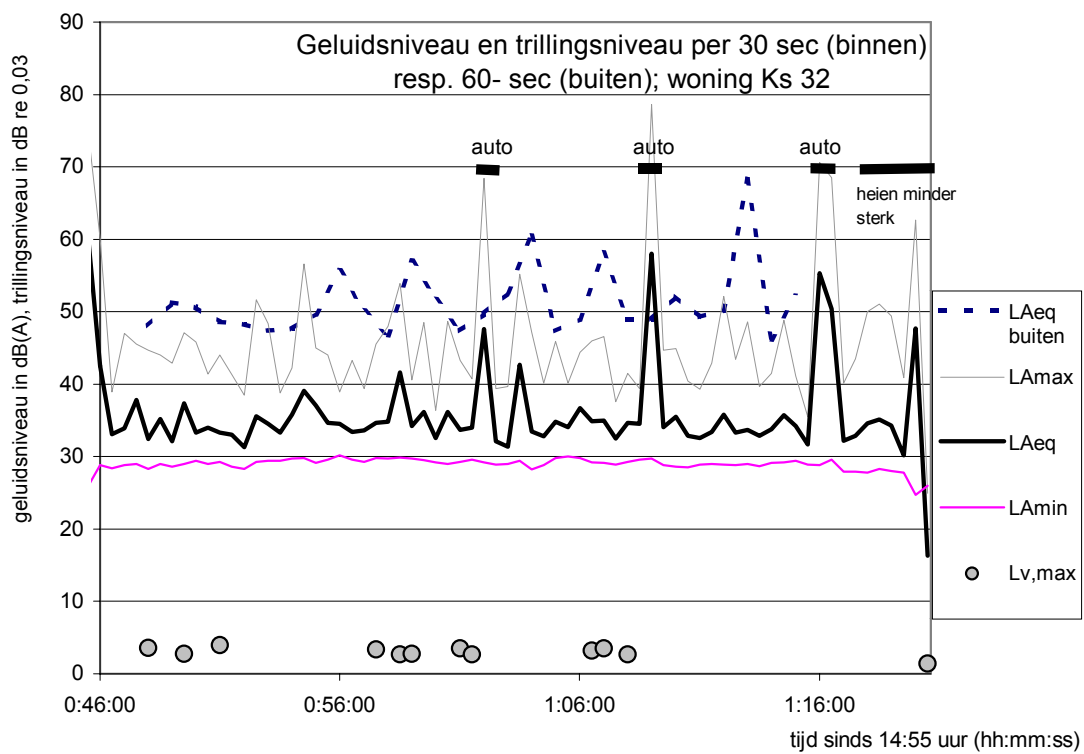
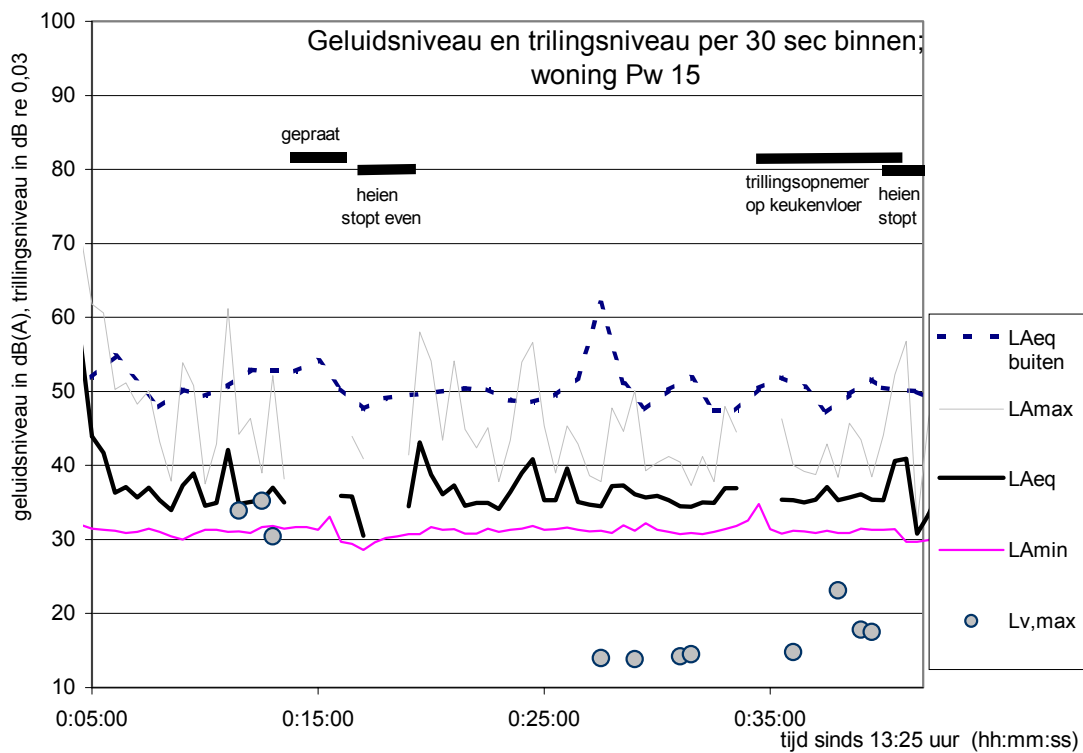
Artikel "Hoorbaar infrageluid door heien in zand"

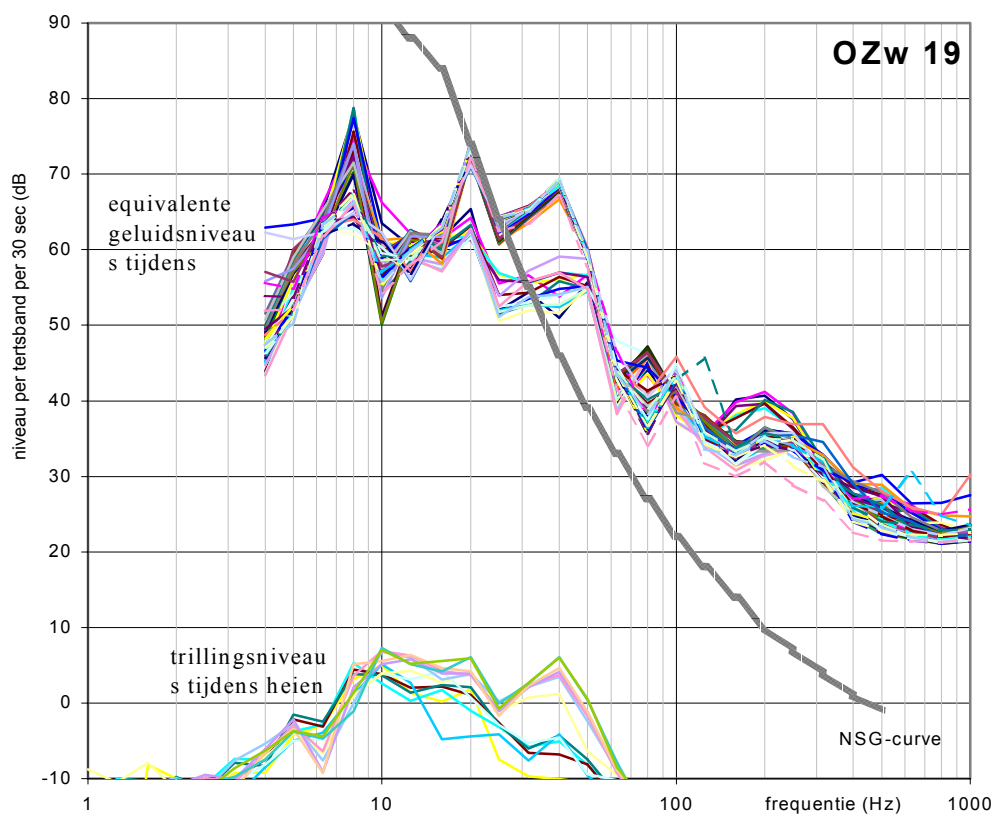
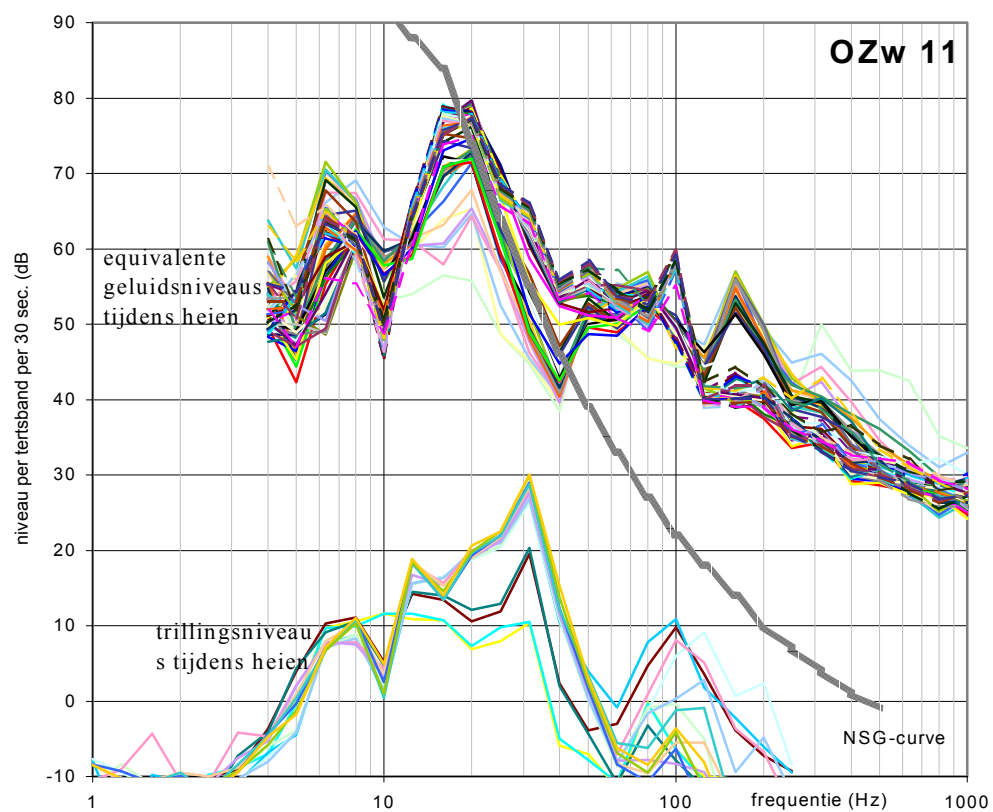
blz. 20

Bijlage A: tijdsverloop van geluids- en trillingsniveaus

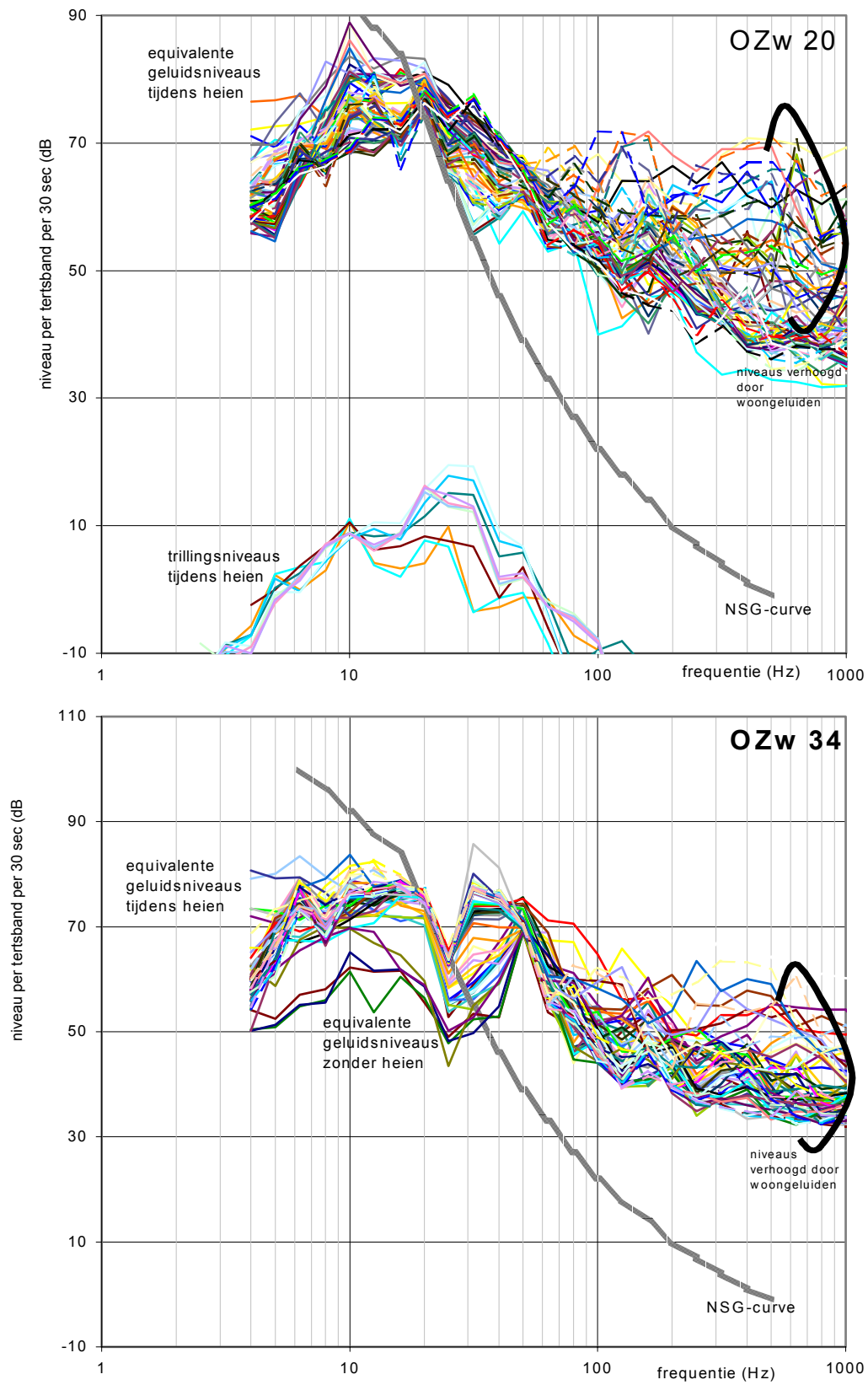


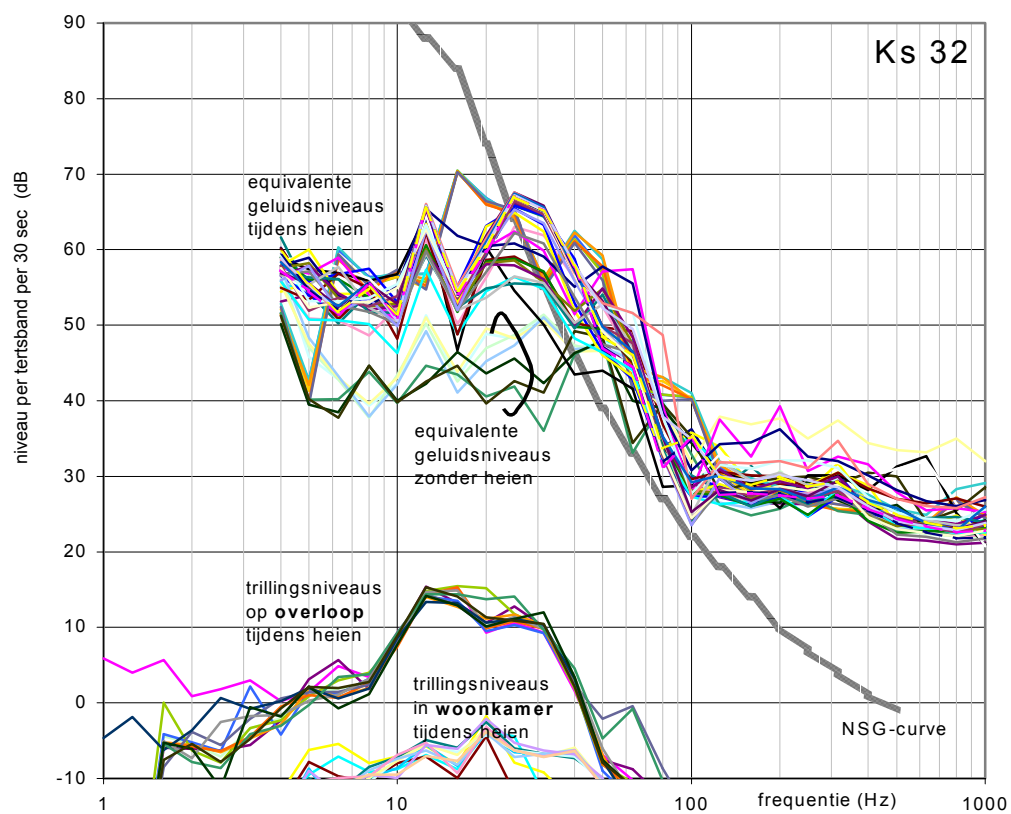
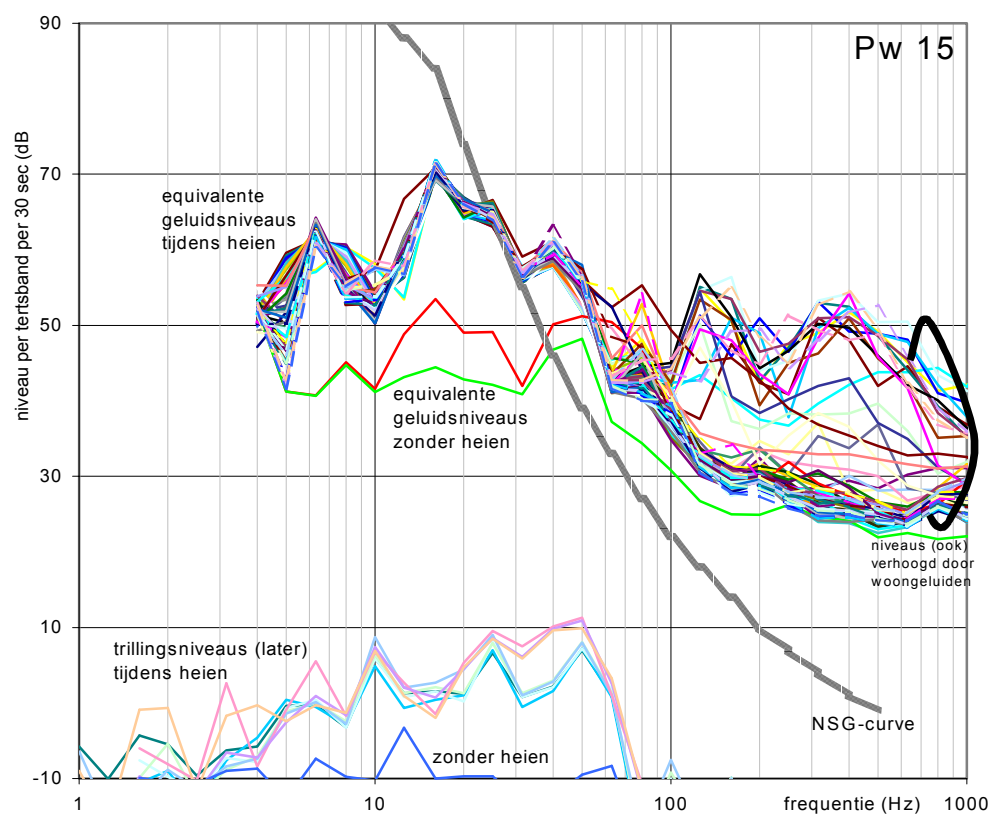
blz. 22



Bijlage B: geluids- en trillingsspectra

blz. 24





Bijlage C: artikel "Hoorbaar infrageluid door heien in zand"

(geschreven ten behoeve van themanummer (BOOR)TUNNELS van tijdschrift Land+Water door Frits van den Berg, hoofd Natuurkundewinkel RuG)

Zevenaar zucht onder heislagen

Bij heiwerkzaamheden in Zevenaar voor de aanleg van een Betuwelijn-spoortunnel kwamen ondefinieerbare klachten naar voren. Bij het heien onder water begonnen huizen te trillen en te ‘zuchten’. Wat was er aan de hand?

In december 2000 werd in Zevenaar begonnen met het heien van palen voor een spoortunnel in de Betuwelijn. Door grotendeels onder water heien was het slaan van het heiblok op de paal niet hoorbaar. Toch leidde het tot zoveel klachten van omwonenden dat een tijdelijke heiverbod werd ingesteld. De klachten betroffen niet alleen de sterkte maar vooral ook de aard van het geluid. Wethouder Klomp-Kuipers in een interview in *Land+Water* van april 2001: “Je weet werkelijk niet wat je meemaakt. Als ze aan het heien zijn trilt bijna alles binnen. Anderen krijgen door de laagfrequente trillingen een unheimisch gevoel.”

Het leek erop dat vooral het laagfrequente karakter van het geluid de sensatie zo onaangenaam maakte. In januari werd tijdelijk een ander type palen (vibrocompalen, in feite stalen buizen) geheid, waarbij metingen werden verricht van de trillingen en het geluid. Hierbij werd boven water geheid; de heislagen waren in de wijde omgeving hoorbaar. In een overleg van de gemeente met de Projectorganisatie Betuweroute werden duidelijker normen afgesproken voor de geluidsbelasting en de trillingssterkte in woningen. Eind februari werd daarop weer begonnen met het onder water heien van de aanvankelijk gebruikte (betonnen) prefabpalen.

Was er bij Zevenaar iets nieuws aan de hand? Dat lijkt er wel op. Daarom worden de bevindingen uit onderzoek hier besproken. De nadruk ligt daarbij op de trillingen en het daardoor veroorzaakte laagfrequente geluid.

Heien

De heipalen zijn niet bedoeld om de tunnelbak te dragen, maar om te voorkomen dat deze gaat opdrijven in het grondwater. Ze worden dan ook niet een slappe ondergrond in gedreven tot een draagkrachtiger laag is bereikt, maar worden voor een groot deel een draagkrachtige zandige bodem in geheid. De palen variëren in lengte tot ruim 30 meter; het heien duurt per paal tot ruim een half uur. Met ongeveer één heislag per seconde daalt een paal met elke slag gemiddeld dus zo’n 1,5 cm.

Tijdens het heien onder water kan men in een nabije woning het volgende waarnemen. De heislagen zelf zijn, nadat de eerste fase van het heien (boven water) voorbij is, niet hoorbaar. Het huis trilt bij elke slag en men hoort het als het ware ‘zuchten’: het huis beweegt en maakt geluid op een manier die lastig te beschrijven is, onder andere omdat het (ook voor de onderzoeker) een uiterst ongebruikelijke ervaring is. Bij elke ‘zucht’ trillen dingen mee (deuren, kasten, servies) of kraakt een constructiedeel zoals een kozijn. Ook buitenshuis is het heigeluid na de eerste fase nauwelijks of niet meer waarneembaar. Wel hoort men de

heimachine zelf meer en minder geluid maken in het tempo van het heien. De bodemtrillingen kan men duidelijk voelen.

Bij het boven water heien (van de vibrocompalen) kan men buiten een trilling in de bodem voelen, gevolgd door het hoorbare, luchtgedragen geluid van de heislagen. Nabij de heistelling volgen deze gebeurtenissen elkaar zo snel op dat ze moeilijk (zintuiglijk) te onderscheiden zijn. Het tijdsverschil wordt verder van de heistelling echter groter, zodat men ze dan wel afzonderlijk kan waarnemen. Binnenshuis hoort men eerst een kort geluid ('bonk') als de bodemgolf passeert. Afhankelijk van de afstand tot het heien hoort men vrijwel tegelijk of, op grotere afstand, daaropvolgend het geluid van de heislagen dat door de lucht (en gevel) aankomt. Dit wordt gevolgd door een zeer laagtonig geluid en het meetrillen van voorwerpen in huis.

Los van het heien zelf veroorzaken de bouwwerkzaamheden nog veel meer 'gewoon' en ook laagfrequent lawaai, onder andere van stationaire machines, aggregaten en zware en lichte voertuigen voor de aan- en afvoer van materialen. Afgezien daarvan is de omgeving relatief stil en kan men af en toe ander wegverkeer en treinen op het bestaande spoor horen.

Beoordeling

In de tussen NS en gemeente afgesloten projectovereenkomst is vastgelegd dat het bouwlawaai op de gevels van woningen beoordeeld zou worden volgens de Circulaire Bouwlawaai. Voor het geluid binnenshuis gold aanvankelijk geen aparte beoordeling. De referentiecurve van de NSG wordt in den lande bij klachten over laagfrequent geluid in woningen gehanteerd en is een drempel waarbeneden dat geluid voor de meeste mensen niet hoorbaar zal zijn. Vanaf circa 25 Hz zou men een niveau van 20 dB(A) kunnen hanteren als norm voor *hinder* van laagfrequent geluid; deze waarde wordt toegepast in Deense en Duitse richtlijnen. Hieronder worden de frequentiebanden van 16 tot en met 25 Hz tezamen beschouwd als *infrageluid*. Infrageluid is zeer laagtonig geluid dat we in het dagelijks leven vrijwel nooit horen. Het geluid van een laag overvliegende straaljager - met frequenties van 100-1000 Hz een enorm lawaai - zouden we niet kunnen horen als het een frequentie van 10 Hz of lager had.

Criteria voor hoorbaarheid (NSG-curve) en hinder (20 dB(A)) van laagfrequent geluid
(ongewogen geluidsniveaus per tertsbands)

frequentie (Hz)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100
NSG-curve	92	88	84	74	62	55	46	39	33	27	22
20 dB(A)					65	59	55	50	46	43	39

Uit de literatuur blijkt dat gezondheidseffecten al kunnen optreden als infrageluid waarneembaar is. Dit hangt onder andere samen met het feit dat een geringe toename van het niveau van infrageluid een relatief grote toename in de ervaren geluidsterkte veroorzaakt.

Trillingen in woningen worden beoordeeld volgens twee richtlijnen van de Stichting Bouwresearch (SBR). De *schadelijkheid* van trillingen wordt beoordeeld volgens SBR1. De *hinderlijkheid* wordt bepaald volgens SBR2, waarbij binnenshuis op de vloer wordt gemeten. Omdat de heiwerkzaamheden een beperkt deel van de tijd in de directe omgeving

van een woning voorkomen (de heistelling staat ongeveer een maand in één compartiment of bouwkuip; een nabije woning zal tenminste gedurende die tijd waarneembare trillingen ondergaan) wordt op de streefwaarden van SBR2, die gelden voor over lange tijd voorkomende trillingen, een ophoogfactor toegepast. De gemeten trillingssterkte is dimensieloos en in feite een frequentiegewogen trillingssnelheid in mm/s. De drempel waarboven mensen verticale bodem/vloertrillingen kunnen *voelen* ligt (bij 10-20 Hz) bij ongeveer 0,05-0,1.

Trillingssterkte en infrageluid

Het heien van de prefabpalen is aanvankelijk, als het heien nog boven water plaatsvindt, duidelijk hoorbaar: de heislagen veroorzaken op 50 m afstand een respectabele 86 dB(A) (L_{Aeq}). Als dan de paal onder water komt, valt dat geluid buiten weg en zakt ook het geluidsniveau binnenshuis met ongeveer 5 dB(A). De heislagen hebben daarna nauwelijks nog invloed op het 'gewone'geluidsniveau binnen of buiten maar hebben wel een grote invloed op de trillingssterkte en op het infrageluid in de woning.

De samenhang tussen de hoeveelheid infrageluid en de trillingssterkte van de vloer blijkt complex. De frequentie waarbij de trillingsterkte het grootst is (de dominante frequentie) loopt uiteen van 10 tot 50 Hz. De trillingssterkte veroorzaakt door het heien varieert van 0,04 tot 1,4, waarbij de vibrocompalen voor sterkere trillingen zorgen dan de prefabpalen. De hoeveelheid infrageluid varieert van 67 tot 82 dB, waarbij geen duidelijk verschil is tussen beide typen palen. Men kan het infrageluid relateren aan de trillingssterkte door het verschil te beschouwen tussen de hoeveelheid infrageluid en de trillingssterkte uitgedrukt in dB. In feite corrigeert men dan de hoeveelheid infrageluid naar een eenheid van trillingsterkte (waarvoor hier 0,1 is genomen, de drempelwaarde volgens SBR1). Het blijkt dan dat het per eenheid van trillingsterkte opgewekte infrageluidsniveau bij de vibrocompalen gemiddeld 58 dB bedraagt, bij de prefabcompalen 12 dB meer (70 dB).

Het meeste infrageluid wordt niet per se geproduceerd bij de dominante trillingsfrequentie: per eenheid van trillingssterkte wordt bij alleen de dominante frequentie gemiddeld 66 dB geproduceerd, waarbij echter forse verschillen tussen woningen optreden. Bij die frequentie waarbij relatief het meeste infrageluid ontstaat, blijkt echter wel een eenduidig verband: per eenheid van trillingssterkte ontstaat bij die frequentie 80 dB infrageluid. Overigens geldt dit weer niet voor een kleinere kamer op de eerste verdieping van een nabije woning, waar dit niveau 10 dB lager lag.

Frequentieverschuiving

Het onder water heien van prefabpalen veroorzaakte ernstige klachten bij omwonenden. Die hadden geen betrekking op het gebruikelijke (luchtgedragen) geluid van harde heislagen (die bij het onderwater heien ontbraken), maar op de combinatie van trillingen met een 'unheimisch' laag geluid: infrageluid. Bij het later (boven water) heien van vibrocompalen leken de bewoners daar minder last van te hebben. Uit de metingen blijkt dat, in vergelijking met de vibrocompalen, de trillingssterktes bij de prefabpalen minder groot, maar de niveaus van infrageluid vergelijkbaar waren. De prefabcompalen produceren dus naar verhouding minder (vloer) trillingen en meer infrageluid.

Het infrageluid blijkt niet speciaal het sterkst bij frequenties waarin de trilling het sterkst is. Bij de frequentie waarbij door de begane grondvloer naar verhouding het meeste infrageluid

wordt geproduceerd, blijkt per eenheid van trillingssterkte een constante hoeveelheid infrageluid te worden geproduceerd: 80 dB op basis van een trillingssterkte van 0,1. Om minder dan 74 dB infrageluid te produceren bij 20 Hz, moet dus de trillingssterkte ten minste lager zijn dan 0,025 (namelijk: 0,1-6 dB). Bij 16 Hz zou dit 0,25 zijn, bij 25 Hz 0,0025. Uit deze getallen blijkt hoe groot de invloed van de frequentie is.

Overzicht van infrageluidsniveaus (16 - 25 Hz) in woonkamers en trillingssnelheden van begane grond vloer in vier woningen op afstanden van 75 tot 300 meter van de heistelling bij heien met prefab palen (A...D) en van vijf woningen op afstanden van ca. 60 tot 150 m bij heien met vibrocom palen (C...F, C zelfde als in groep A...D).

type paal	waarden bij frequentie f_{dom} waarbij sterkste trillingen optreden							waarden bij frequentie f_l waarbij relatief meeste infrageluid ontstaat			
	v_{tril}	L_{infrac}	L_{infrac} indien $v_{tril} = 0,1$	f_{dom}	v_{tril}	L_{infrac}	L_{infrac} indien $v_{tril} = 0,1$	f_l	v_{tril}	L_{infrac}	L_{infrac} indien $v_{tril} = 0,1$
	-	dB	dB	Hz	-	dB	dB	Hz	-	dB	dB
prefab											
A	0.4	82	70	25	0.16	72	68	10	0.09	80	81
B	0.1	72	70	10	0.06	59	64	20	0.04	71	78
C	0.2	73	65	50	0.09	55	57	16	0.03	70	80
D	0.04	67	75	20	0.02	60	74	25	0.01	65	82
	gemiddeld		70				66				80
vibro											
C	0.3	72	62					25		68	
E	0.5	67	53					25			
F	0.9	81	62					#16		67	
G	1.4	79	56					#16		79	
F	0.6	72	56					#16		72	
	gemiddeld		58								

Metingen C...F uitgevoerd door Fugro Ingenieursbureau NV en Grontmij Verkeer & Infrastructuur

Dat infrageluid tengevolge van dergelijke lage trillingsniveaus hinder veroorzaakt, hangt wellicht samen met de relatief lange duur van de blootstelling. Het is echter waarschijnlijker dat de klachten optreden omdat er bij dit heien *waarneembaar* infrageluid ontstaat. Bodemtrillingen en diengevolge infrageluid zullen bij heien altijd ontstaan, maar het heien in een stevige ondergrond (zand) veroorzaakt korte slagen waardoor bodemtrillingen met hogere frequenties worden opgewekt. Omdat de gehoordrempel bij infrageluid zeer steil loopt, kan een frequentieverschuiving sterke gevolgen hebben voor de hoorbaarheid. Een geluid van 96 dB is voor de meeste mensen bij 10 Hz (net) niet hoorbaar, maar zou bij 20 Hz een luidheid hebben die overeenkomt met 40-50 dB(A); een simpele frequentieverschuiving zorgt dus voor een overgang van onhoorbaar naar tamelijk luid. Het is opmerkelijk dat de klachten bij de prefabpalen het sterkst leken: de blootstelling aan

blz. 30

trillingen en ‘gewoon’ geluid (van de heislagen) was daar minder dan bij de vibrocompalen. Wat overbleef was een relatief zuivere blootstelling aan infrageluid.

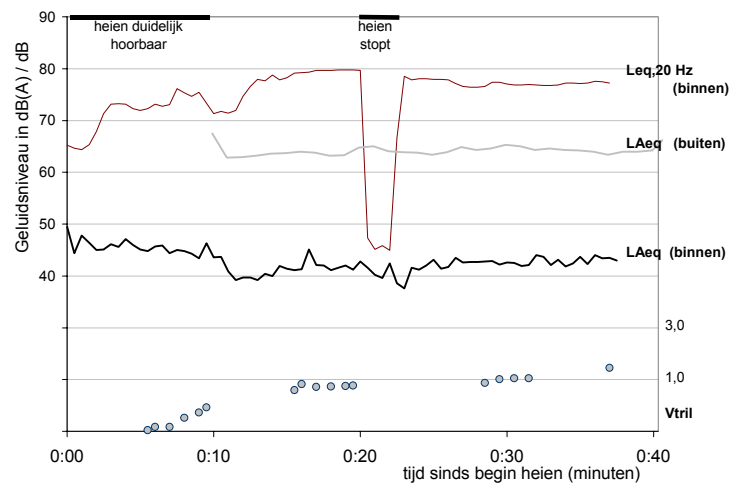
Nader onderzoek

Dat de relatie tussen bodemtrillingen, vloertrillingen en infrageluid niet eenvoudig is, ligt er ten eerste aan dat de vloer relatief sterk trilt als de bodemtrilling overeenkomt met de resonantiefrequentie met de vloer (die afhangt van de afmetingen, het materiaal en de oplegging) en ten tweede dat de afstralgraad van de vloer hoog is (die weer afhangt van het materiaal en de frequentie).

Het ‘nieuwe heien’ vergt dus nog wel wat onderzoek alvorens de effecten in woningen en op bewoners preciezer kunnen worden voorspeld.

Geluids- en trillingssterktes

Het verloop in de tijd van geluids- en trillingssterktes tijdens het heien van een prefabpaal. Het geluid (L_{Aeq}) is gemeten binnen en direct buiten een woning op ongeveer 80 meter van de heistelling. Het heien heeft na de fase boven water ('heien duidelijk hoorbaar') nauwelijks invloed op het geluids-niveau binnen en buiten, maar wel op de trillingssterkte en op het infrageluid binnenshuis. Als het heien even stopt duikt het niveau van de 20 Hz tertsbands steil omlaag en zakt de trillingssterkte van ongeveer 1,0 tot ver onder de 0,1.



Geluids- en trillingsspectra

Geluids- en trillingsspectra per 30 seconden, zodat variaties met de tijd zichtbaar worden. Het heien is oorzaak van een toename van de trillings-sterkte en het geluids-niveau bij lage frequenties (tot 50 Hz).

De NSG-curve is de gehoordrempel van oudere mensen die relatief goed horen (10% van de 50- 60 jarigen hoort beter, 90 % slechter). De vergelijkbare drempel voor jongeren ligt maar weinig (3 dB) lager. Geluid boven deze drempel kan als hoorbaar worden beschouwd voor tenminste 10% van de bevolking. Hier blijkt dat er door het heien *hoorbaar* geluid ontstaat bij lage frequenties (20 - 40 Hz). Vanwege de bouwwerkzaamheden (bouwmachines, pompen, aggregaten, zwaar verkeer e.d.) is er ook na het heien min of meer continu geluid bij frequenties \geq 50 Hz.

